

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ**  
**ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Физико-технический

Направление подготовки 14.04.02 Ядерная физика и технологии

Кафедра Физико-энергетических установок

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Исследование влияния давления прессования исходной шихты реагентов на режимы управления самораспространяющегося высокотемпературного синтеза при иммобилизации твердых отходов</b>

УДК 621.039.73

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ4В	Грицевич Максим Павлович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Демянюк Д.Г.	К.Т.Н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН ИСГТ	Верховская М.В.	К.ЭКОН.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	Гоголева Т.С.	К.ф.-М.Н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ФЭУ	Долматов О.Ю.	К.ф.-М.Н., доцент		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП

Код результата	Результат обучения
<b><i>Профессиональные компетенции</i></b>	
P1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов в профессиональной деятельности.
P2	Ставить и решать инновационные инженерно-физические задачи, реализовывать проекты в области использования ядерной энергии, ядерных материалов, систем учета, контроля и физической защиты ядерных материалов, технологий радиационной безопасности, медицинской физики и ядерной медицины, изотопных технологий и материалов.
P3	Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие конденсированное состояние вещества, распространение и взаимодействие ионизирующих излучений с веществом и живой материей, физику кинетических явлений, процессы в реакторах, ускорителях, процессы и механизмы переноса радиоактивности в окружающей среде.
P4	Разрабатывать новые алгоритмы и методы: расчета современных физических установок и устройств; исследования изотопных технологий и материалов; измерения характеристик полей ионизирующих излучений; оценки количественных характеристик ядерных материалов; измерения радиоактивности объектов окружающей среды; исследований в радиоэкологии, медицинской физике и ядерной медицине.
P5	Оценивать перспективы развития ядерной отрасли, медицины, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности руководствуясь законами и нормативными документами, составлять экспертное заключение.
P6	Проектировать и организовывать инновационный бизнес, разрабатывать и внедрять новые виды продукции и технологий, формировать эффективную стратегию и активную политику риск-менеджмента на предприятии, применять методы оценки качества и результативности труда персонала, применять знание основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.
<b><i>Общекультурные компетенции</i></b>	
P7	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности.
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.
P9	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Физико-технический

Направление подготовки 14.04.02 Ядерная физика и технологии

Кафедра Физико-энергетические установки

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

Долматов О.Ю.

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

### ЗАДАНИЕ

#### на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
0AM4B	Грицевичу Максиму Павловичу

Тема работы:

Исследование влияния давления прессования исходной шихты реагентов на режимы управления самораспространяющегося высокотемпературного синтеза при иммобилизации твердых отходов	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	26.02.2016 № 1618/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:	20.06.2016
--	------------

#### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<b>Исходные данные к работе</b>	
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Провести литературный обзор по заявленной тематике</li> <li>– Модернизировать лабораторный комплекс СВ-синтеза для проведения экспериментов в рамках диссертационной работы</li> <li>– Провести эксперименты в рамках научно-исследовательской работы</li> <li>– Провести анализ данных, полученных экспериментальным путем и определить возможность управления технологией СВ-синтеза при помощи параметра давления прессования</li> </ul>

	исходной шихты
<b>Перечень графического материала</b>	
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Верховская М. В.
Социальная ответственность	Гоголева Т. С.
Иностранный язык	Ермакова Я. В.
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	
Введение	
Современное состояние методов и технологий иммобилизации радиоактивных материалов	
Обоснование выбора шихты реагентов для обеспечения самовоспламеняющегося высокотемпературного синтеза	
Приборы и техника проведения эксперимента	
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	
Социальная ответственность	
Заключение	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	01.02.2016
---	------------

**Задание выдал руководитель:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Демянюк Д.Г.	к.т.н.		01.02.2016

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
0AM4B	Грицевич Максим Павлович		01.02.2016

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА**  
**«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И**  
**РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0AM4B	Грицевич Максим Павлович

Институт	Физико-технический	Кафедра	ФЭУ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерно-технический контроль и регулирование

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Оценочная карта конкурентных технических решений
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Иерархическая структура работ SWOT-анализ Календарный план-график реализации проекта
3. Оценка ресурсной, финансовой, социальной, бюджетной эффективности научного исследования	Определение ресурсоэффективности проекта

**Перечень графического материала** (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Оценочная карта конкурентных технических решений
2. Матрица SWOT
3. Иерархическая структура работ
4. Календарный план проекта
5. Бюджет проекта
6. Определение ресурсоэффективности проекта

**Дата выдачи задания для раздела по линейному графику**

<b>Задание выдал консультант:</b>				
Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН ИСГТ	Верховская М.В.	к.ЭКОН.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM4B	Грицевич Максим Павлович		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM4B	Грицевич Максим Павлович

Институт	Физико-технический	Кафедра	ФЭУ
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	14.04.02 Ядерные физика и технологии/ Ядерно-технический контроль и регулирование

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных факторов производственной среды (метеоусловия, освещение, шумы, электромагнитные поля);</li> <li>– опасных факторов производственной среды (электрической, пожарной природы)</li> </ul>
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	электробезопасность, пожаробезопасность, требования при работе на ПЭВМ

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– воздействие на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм;</li> <li>– предлагаемые средства защиты.</li> </ul>
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</li> </ul>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM4B	Грицевич Максим Павлович		

## РЕФЕРАТ

Представленная на рецензию магистерская диссертация состоит из 110 страниц, содержит 12 рисунков, 31 таблица, 49 источников, 2 приложения.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, иммобилизация, шихта реагента, синтез.

Объект исследования – изучение возможности управления самораспространяющимся высокотемпературным синтезом при помощи параметра давления прессования исходной шихты.

Цель работы заключается в исследовании влияния давления прессования исходной шихты реагентов на режимы управления самораспространяющегося высокотемпературного синтеза при иммобилизации твердых отходов.

Практическая польза и новизна заключаются в улучшении функциональных свойств, повышении энергетической эффективности и экологической безопасности при применении плазменной технологии в области модификации материалов.

Результаты, полученные в ВКР могут быть применены при создании технологии иммобилизации радиоактивных отходов методом СВ-синтеза.

## Содержание

Введение.....	10
Глава 1. Современное состояние методов и технологий иммобилизации радиоактивных материалов.....	12
1.1 Классификация радиоактивных отходов.....	13
1.2 Современные методы иммобилизации радиоактивных отходов.....	25
1.2.1 Цементирование радиоактивных отходов .....	25
1.2.2 Битумирование радиоактивных отходов .....	26
1.2.3 Остекловывание радиоактивных отходов .....	26
1.2.4 Самовоспламеняющийся высокотемпературный синтез, альтернативный вид иммобилизации радиоактивных отходов .....	27
Глава 2. Обоснование выбора шихты реагентов для обеспечения самовоспламеняющегося высокотемпературного синтеза .....	33
Глава 3. Приборы и техника проведения эксперимента <b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
3.1 Оборудование и схема эксперимента.. <b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
3.2 Экспериментальная часть..... <b>Ошибка! Закладка не определена.</b>	
3.2.1 Эксперимент с шихтой W-B .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.2.2 Эксперимент с шихтой W-B с добавлением примеси NiAl проведенный в вакуумной среде .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
3.2.3 Эксперимент с шихтой W-B с добавлением примеси NiAl проведенный в атмосфере .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	41
4.2.2 Контрольные события проекта .....	47
4.2.3 План проекта.....	48
4.3 Бюджет научного исследования .....	51
4.3.1 Расчёт материальных затрат .....	51
Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле: .....	51
4.3.2 Расчёт затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных работ) .....	52



4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы.....	53
4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	55
4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды .....	56
4.3.6 Накладные расходы.....	56
4.3.7 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта.....	57
4.4 Организационная структура проекта .....	57
4.5 Матрица ответственности .....	58
4.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	60
Глава 5. Социальная ответственность.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5.2 Электробезопасность .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5.3 Пожарная безопасность .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5.4 Регулирование уровня шума .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5.5 Показатели микроклимата в помещении .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5.6 Освещённость рабочей зоны .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
5.7 Психофизиологические вредные факторы .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Заключение .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Список публикаций студента.....	64
Список использованных источников .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Приложение А .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>

## Введение

На сегодняшний день становятся актуальными вопросы, связанные с повышением надежности и безопасности ядерных энергетических установок различного назначения. Решение данных вопросов можно найти при помощи создания новых, с лучшими требуемыми свойствами, материалов, а так же совершенствования методов их получения.

Распространение в области ядерных энергетических установок получили функциональные материалы, созданные при помощи керамических технологий. Например, создание перспективных ядерных топливных композиций: сульфиды, нитриды, карбиды делящихся и сырьевых нуклидов; создание коррозионностойких и жаропрочных замедляющих материалов: карбид циркония, нитрид бериллия; синтез материалов для изготовления элементов систем управления и защиты ядерных энергетических установок: сульфид кадмия, нитрид гафния, карбид гафния а так же получение компактных высокоэффективных защитных материалов. Однако традиционные технологии создания материалов, перечисленные выше, имеют ряд значимых недостатков, из можно выделить высокие временные и энергозатраты, сложное аппаратное обеспечение и др. Как следствие существует необходимость в использование нетрадиционных для ядерной техники технологических подходов в создание требуемых материалов. Перспективным направлением керамических технологий является метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), разработанный в 1967 г. в Институте структурной макрокинетики РАН академиком А.Г.Мержановым и сотрудниками.

Данный метод обладает рядом преимуществ, такими как: простота аппаратного исполнения, малые времена протекания синтеза, сравнительно малые энергозатраты и т.д. Помимо этого, СВС характеризуется тем, что при протекания реакции образуется высокотемпературная среда, допускающая различные типы дополнительных внешних воздействий, посредством

которых возможно регулирование структуры и свойств конечных продуктов, т.е. позволяет получать новые материалы с требуемым набором свойств. Это дает возможность использовать СВС-технологии в ядерной технике, что подтверждается теоретическими и экспериментальными исследованиями.

### **Цель работы**

Исследование влияния давления прессования исходной шихты реагентов на режимы управления самораспространяющегося высокотемпературного синтеза при иммобилизации твердых отходов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Провести литературный обзор по заявленной тематике
- 2) Модернизировать лабораторный комплекс СВ-синтеза для проведения экспериментов в рамках диссертационной работы
- 3) Провести эксперименты в рамках научно-исследовательской работы
- 4) Провести анализ данных, полученных экспериментальным путем и определить возможность управления технологией СВ-синтеза при помощи параметра давления прессования исходной шихты

## **Глава 1. Современное состояние методов и технологий иммобилизации радиоактивных материалов**

Непрерывно растущие потребности человечества в электроэнергии предопределили современные темпы развития ядерной энергетики. Увеличение темпов развития ядерной энергетики потянет за собой увеличение количества вовлеченных в оборот топливных ядерных материалов. Уровень развития ядерных технологий Российской Федерации позволяет многократно использовать отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) в ядерном цикле. Однако, это приводит к образованию все больших объемов радиоактивных отходов (РАО) на предприятиях ЯТЦ. В связи с тем, что накопление отходов продолжается, усилия специалистов развитых стран направлены на разработку и совершенствование способов их иммобилизации. Комплексную защиту окружающей среды в перерабатывающей и энергетической промышленности можно осуществлять путем пересмотра производственного процесса, повторной утилизации отходов и более безопасного расположения отходов с целью уменьшить или избежать действия загрязняющих веществ. Новый механизм процесса (производство тех же или подобных продуктов с использованием меньших количеств сырьевых материалов, энергии, а также меньший выход загрязняющих веществ), оборот материалов (повторная утилизация остатков и отходов и сокращение расхода исходных материалов) и безопасное захоронение отходов составляют характерные элементы модели устойчивого развития. Одной из таких технологий является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС).

Были выделены следующие подразделы, которые необходимо рассмотреть в рамках диссертации:

- классификация отходов и их захоронение с точки зрения нераспространения;
- современные технологии утилизации и хранения отходов;

- описание технологии СВС с точки зрения сравнения с другими методами утилизации отходов;

## **1.1 Классификация радиоактивных отходов**

Радиоактивные отходы (РАО) – это ядерные материалы и радиоактивные вещества, дальнейшее использование которых не предусматривается. Содержание радионуклидов в таких отходах превышает уровни освобождения от контроля, установленные государственным регулирующим органом. Радиоактивные отходы образуются в трех сферах человеческой деятельности, а именно, при эксплуатации и выводе из эксплуатации объектов ядерного топливного цикла (ЯТЦ), вне ЯТЦ при использовании радиоактивных веществ в научных, производственных и медицинских целях, в результате радиационных аварий и их ликвидации.

В виду разнообразия источников происхождения радиоактивным отходам присуще большое разнообразие составов и физико-химических свойств. Достаточно широко меняется также объем РАО – от малого, характерного для сфер, не относящихся к ЯТЦ, до очень большого, образующегося на обогатительных производствах при добыче урана. В связи с этим большое значение в сфере обращения с РАО придается их классификации, которая и определяет направление технической деятельности в отношении РАО.

При классификации отходов рассматривается ряд параметров, определяющих потенциальную опасность РАО для человека и окружающей среды, ключевыми из которых являются радиологические свойства (критичность, период полураспада, активность и концентрация радионуклидов). Во многих странах используется классификация, которая подразумевает деление РАО по уровню активности на три группы: отходы низкого (НАО), среднего (САО) и высокого (ВАО) уровня активности. Более значимым параметром является период полураспада радионуклидов,

входящих в состав отходов, на основании которого изотопы можно разделить на три категории.

К первой категории относят короткоживущие радионуклиды ( $T_{1/2}=0,3-1$  год), которые за время хранения (выдержки) практически полностью распадутся и в дальнейшем могут быть исключены из рассмотрения в качестве РАО.

Во вторую группу включают изотопы с периодом полураспада 1-30 лет, подлежащие долговременному контролируемому хранению (300-500 лет). В третью категорию попадают долгоживущие радионуклиды с  $T_{1/2}>30$  лет, требующим хранения в течение срока от 300 до 106 лет и более. В этом случае говорят об окончательном удалении РАО из биосферы посредством захоронения.

В настоящее время многие страны в своем подходе к обращению к РАО используют классификацию МАГАТЭ, в основе которой лежит учет вариантов окончательного захоронения РАО. Основным признаком классификации служит длительность распада нуклида т.к. требования к технологии захоронения отходов во многом определяются временем, в течение которого отходы сохраняют токсичность. Согласно этой системе классификации, отходы подразделяются на следующие категории. (Таблица 1).

Таблица 1.1 – Типичные характеристики классов отходов согласно классификации МАГАТЭ

Классы отходов	Типичные характеристики	Метод захоронения
1. Освобожденные от контроля отходы (EW)	Уровни активности не превышают уровни, основанные на годовой дозе для населения не более 0,01 мЗв	Нет радиологических ограничений
2. Низко- и среднеактивные отходы (LILW)	Уровни активности выше разрешенных величин и тепловыделение ниже 2 Вт/мЗ	

Продолжение таблицы 1.1 – Типичные характеристики классов отходов согласно классификации МАГАТЭ

2.1. Отходы с короткоживущими нуклидами (LILW-SL)	Ограниченная концентрация долгоживущих радионуклидов (меньше 4000 Бк/г в отдельных упаковках отходов, и в среднем 400 Бк/г для всех упаковок)	Приповерхностные или глубинные геологические хранилища
2.2. Отходы с долгоживущими нуклидами (LILW-LL)	Концентрация долгоживущих радионуклидов выше пределов для короткоживущих отходов	Глубинные геологические хранилища
3. Высокоактивные отходы (HLW)	Тепловая мощность выше 2 кВт/м <sup>3</sup> и концентрация долгоживущих радионуклидов выше пределов для короткоживущих отходов	Глубинные геологические хранилища

Отходы, освобожденные от контроля – отходы, содержащие такие низкие концентрации радионуклидов, что они могут быть освобождены от ядерного регулирующего контроля, поскольку радиологическая опасность отходов незначительна. Пределы радионуклидов для этой категории отходов называются уровнями освобождения. Они устанавливаются органами государственного регулирования, принимая во внимание критерии для освобождения материалов от регулирующего контроля. Уровни освобождения рассчитываются из условия, что при всех сценариях облучения индивидуальная доза не должна превышать 10 мкЗв в год.

Низко и среднеактивные отходы – отходы, содержащие такие количества радионуклидов, что необходимы меры для защиты персонала и населения. Этот класс охватывает очень широкий диапазон радиоактивных отходов, начиная с отходов, слегка превышающих уровень отходов, освобожденных от контроля, до отходов, содержащих такие высокие уровни активности, что требуются биологическая защита и даже охлаждение. В этой категории выделены две группы отходов, содержащих короткоживущие и

долгоживущие радионуклиды. Способы захоронения низко и среднеактивных отходов разнообразны.

Высокоактивные отходы – отходы, содержащие такие высокие количества радионуклидов, что в течение значительного периода времени необходима высокая степень их изоляции от биосферы. Такие отходы требуют создания экранирующей оболочки (биологической защиты) и охлаждения.

Граничные уровни – граничные уровни при классификации предлагаются в терминах параметров, наиболее уместных для безопасного захоронения радиоактивных отходов. Категория низко- и среднеактивных отходов подразделяется на короткоживущие и долгоживущие. Приповерхностное захоронение может быть подходящим методом для короткоживущих, однако для долгоживущих отходов может оказаться необходимым захоронение в глубоких геологических формациях. Дополнительные соображения приводятся для тех случаев, когда радиоактивные отходы характеризуются долгоживущими естественными радионуклидами, имеет место значительное выделение тепла благодаря радиоактивному распаду; когда применяется сегрегация радиоактивных отходов для приповерхностного или геологического захоронения; и когда образуются жидкие или газообразные отходы. Граничные уровни между классами характеризуются лишь порядком величины активности. Конкретные значения активности, пригодные для дальнейшего подразделения отходов в пределах одного класса, – прерогатива национальной системы классификации.

Согласно Российской классификации твердые и жидкие РАО по удельной активности подразделяются на три категории (Таблица 2), границы между которыми определяются нормативными документами ОСПОРБ-2000 и СПОРО-2002 [6].



Таблица 1.2 – Классификация жидких и твердых радиоактивных отходов по удельной радиоактивности

Удельная активность, кБк/кг			
Категория отходов	Бета-излучающие радионуклиды	Альфа-излучающие нуклиды	Трансурановые радионуклиды
Низкоактивные	менее $10^3$	менее $10^2$	менее $10^1$
Среднеактивные	от $10^3$ до $10^7$	от $10^2$ до $10^6$	от $10^1$ до $10^5$
Высокоактивные	более $10^7$	более $10^6$	более $10^5$

Во многих странах применяются национальные системы классификации РАО, учитывающие уровень развития и особенности применяемых ядерных технологий, технико-экономические и другие условия. Во Франции, твердые радиоактивные отходы классифицируются в три категории:

– Категория А: Низко- и среднеактивные отходы, содержащие короткоживущие радионуклиды (время полураспада  $\sim 30$  лет) и содержащие только следы долгоживущих радионуклидов ( $3.7 \times 10^6$  Бк/кг). Эти отходы подлежат захоронению в поверхностных могильниках с ожидаемым административным контролем, не превышающим 300 лет.

– Категория В: Среднеактивные отходы, содержащие долгоживущие радионуклиды (время полураспада  $> 30$  лет), главным образом альфа-излучающие радионуклиды, без существенного тепловыделения, характеризующиеся как TRU отходы с низким выделением тепла, с максимальным содержанием  $3,7 \times 10^6$  Бк/кг, и со средней загрузкой отходов в хранилище, не превышающей  $3,7 \times 10^5$  Бк/кг.

– Категория С или HLW: Отходы, содержащие продукты распада, образующиеся от переработки топлива, отвержденные остекловыванием и характеризующиеся высоким тепловыделением во время их образования.

Во Франции и Великобритании, используется еще одна категория радиоактивных отходов, называемые радиоактивные отходы очень низкого уровня активности. Так в Великобритании под радиоактивными отходами

очень низкого уровня активности понимают отходы, содержащие на каждый 0.1 м<sup>3</sup> менее 400 кБк β/γ активности или единичные упаковки с суммарной активностью менее 40 кБк.

Для решения различных технических вопросов обработки отходов и оптимизации существующих технологий обращения с РАО в практической деятельности возникает необходимость дополнительного деления отходов на категории с учетом таких характеристик, как происхождение (технологические отходы от переработки ОЯТ и нетехнологические отходы от вспомогательных процессов), агрегатное состояние (жидкие, твердые, газообразные отходы), горючесть (водные и органические отходы), патогенная токсичность (медико-биологические отходы), химический состав (кислые и щелочные отходы; отходы с высоким и низким содержанием солей; смешанные отходы, содержащие химически опасные вещества).

Стадии обращение с радиоактивными отходами включают в себя несколько этапов: предварительная обработка, обработка, кондиционирование, хранение/захоронение.

Предварительная обработка является первоначальной стадией обращения с отходами, начинающейся сразу после их образования. Эта стадия чрезвычайно важна, в ее ходе предоставляется наилучшая возможность для разделения отходов на потоки, предназначенные для освобождения от контроля, для конкретных методов обработки, поверхностного или геологического захоронения.

Обработка отходов направлена на повышение безопасности или экономичности посредством изменения характеристик отходов. Примерами операций, составляющих эту стадию обращения, являются: прессование и сжигание (уменьшение объема); выпаривание, фильтрация или ионный обмен в жидких отходах (удаление радионуклидов); осаждение или флоккуляция химических веществ (изменение состава). Часто некоторые из этих процессов используются в сочетании друг с другом для повышения общей эффективности обработки.

Кондиционирование РАО состоит из операций, в процессе которых они переводятся в форму, обладающую химической, термической и радиационной устойчивостью и сохраняющую стабильность в процессе перемещения, перевозки, хранения и захоронения. Операции перевода отходов в твердую форму посредством их отверждения, включения в какую-либо матрицу или заключение в герметичные оболочки определяются термином иммобилизация. Иммобилизованные отходы в свою очередь могут упаковываться в различные контейнеры, начиная от обычных 200- литровых стальных бочек до толстостенных контейнеров сложной конструкции.

Временное хранение РАО в течение достаточно длительного времени для снижения уровня радиоактивности направлено на упрощение и повышение эффективности последующей обработки отходов. Уменьшению конечных объемов отходов с короткоживущими изотопами служит их временное хранение в течение времени естественного распада. Безопасное перемещение отходов от мест образования, к установкам переработки, местам хранения и захоронения производится с использованием специальных транспортных и грузоподъемных средств.

Захоронение заключительная стадия обращения с радиоактивными отходами, заключающаяся в локализации отходов в специально оборудованном хранилище – могильнике при соответствующем обеспечении безопасности без намерения их изъятия, долгосрочного наблюдения за хранилищем и технического обслуживания. Захоронение предусматривает создание многобарьерной системы изоляции, т.е. сооружения вокруг РАО системы естественных и инженерных барьеров, препятствующих выходу радионуклидов в окружающую среду.

Согласно глоссарию МАГАТЭ, **захоронение** – это размещение отходов в санкционированное, специальное сооружение (могильник) без намерения его извлечения. Словарь безопасности МАГАТЭ (“Safety glossary”, 2001) подчеркивает, что отсутствие намерения извлечения не означает его невозможность. Реализация возможности извлечения может

стать актуальной, например, когда статус могильника меняется на хранилище радиоактивных отходов. Захоронение отходов преследует две цели:

- Защитить человека и окружающую среду от вредного воздействия радиоактивных отходов;
- Разместить отходы таким способом, чтобы возможные негативные последствия такого захоронения для будущих поколений были сведены к минимуму.

К захоронению принимаются отходы в твердой форме. Это означает, что жидкие радиоактивные отходы иммобилизуются в твердую матрицу и кондиционируются в соответствующую упаковку перед захоронением. МАГАТЭ дает в качестве вариантов следующие типы захоронений:

- Глубоководное (в контейнерах, на морском дне на глубине около 1000 м.). Осуществлялось до 1982 года согласно Лондонской конвенции (1975) и рекомендациям МАГАТЭ, под контролем NEA OECD. С 1983 года такие захоронения отходов запрещены.

- Геологическое. Предполагает изоляцию отходов в инженерных сооружениях в стабильных геологических формациях на глубине нескольких сотен метров. Предназначено, главным образом, для захоронения высокоактивных и долгоживущих радиоактивных отходов.

- Приповерхностное. Предполагает размещение отходов в инженерных сооружениях на поверхности или ниже поверхности земли, а также в шахтах на глубине несколько десятков метров от поверхности. Предназначено для захоронения короткоживущих, низко и среднеактивных отходов.

- В глубинные отложения морского дна. Предполагало размещение контейнеров с отходами в осадочные породы морского дна на глубине нескольких тысяч метров.

- Под морским дном. Подразумевает размещение отходов в инженерных сооружениях, расположенных в коренных подстилающих породах прибрегового морского дна, с доступом с побережья.

Основные типы захоронения радиоактивных отходов, которые сейчас применяются или интенсивно разрабатываются, это приповерхностное захоронение и захоронение в глубокие геологические формации. При обращении с низко и среднеактивными отходами, которые содержат преобладающе недолгоживущие радионуклиды, принимается во внимание, что опасность отходов после относительно небольшого периода времени (нескольких сотен лет) уменьшится до уровня, при котором нет никакого остаточного риска для человеческого здоровья или окружающей среды. За это время большинство радионуклидов распадется, уменьшая или устраняя риск, связанный с любым возможным отказом (разрушением) удерживающих барьеров. Поэтому для низко и среднеактивных короткоживущих отходов наибольшее развитие во всем мире получил метод приповерхностного захоронения.

Как было отмечено выше, к захоронению принимаются отходы в твердой форме. Следовательно жидкие радиоактивные отходы необходимо иммобилизовать в твердую матрицу. Иммобилизация – операция перевода отходов в твердую форму посредством их отверждения, включения в какую-либо матрицу или заключение в герметичные оболочки.

*Жидкие радиоактивные отходы от переработки отработанного ядерного топлива*

Основным источником образования жидких радиоактивных отходов (ЖРО) является деятельность, связанная с работой ядерных энергетических и промышленных реакторов, а также реакторов ядерных силовых установок. В процессе их работы в ядерном топливе на основе оксида урана нарабатываются высокоактивные продукты деления и актиноиды, активируются различные конструкционные элементы, поэтому первоначально подавляющая часть активности сосредоточена в ОЯТ и активированных конструкциях ядерных реакторов. За счет этого отработавшее ядерное топливо отличается повышенной долговременной радиотоксичностью по сравнению с исходным урановым топливом. Деление

ядер  $^{235}\text{U}$  приводит к накоплению в топливе  $\beta$ -активных продуктов деления с массовыми числами от 72 до 161, активность которых в момент остановки реактора может достигать 1017-1018 Бк/т. В составе ОЯТ тепловых реакторов в среднем содержится 94-95 % урана, около 1 % плутония и 4-5 % осколочных продуктов деления с радиоактивностью до 99 % активности всех материалов атомной энергетики и промышленности. В целом в ОЯТ содержится 99,5 %  $\alpha$ -излучающих радионуклидов и 97,5 %  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучающих радионуклидов, образующихся в результате эксплуатации энергетического реактора на урановом топливе с обогащением по  $^{235}\text{U}$  от 1,9 до 4,4 %.

В зависимости от проводимой в разных странах политики обращения с ОЯТ энергетических реакторов, соответствующей открытому или закрытому ЯТЦ, облученное топливо рассматривается как отходы, подлежащее, в конечном счете, окончательному захоронению без переработки (США, Канада, Швеция, Финляндия и др.), или ценное энергетическое сырье (Россия, Франция, Великобритания, Индия, Япония), соответственно. В случае замкнутого ЯТЦ ОЯТ энергетических реакторов подвергается переработке с извлечением из него плутония и урана для производства нового ядерного топлива (U-Pu оксидное топливо, или MOX-топливо) и отдельных радиоизотопов. В процессе переработки ОЯТ образуется значительное количество РАО, содержащих продукты деления, минорные актиноиды ( $^{241}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ), технологические «потери» выделения плутония и урана, некоторые компоненты загрязненных конструктивных элементов. Следует отметить, что ОЯТ промышленных реакторов, нарабатывающих «оружейный» плутоний, перерабатывается всегда, независимо от политики страны в отношении ОЯТ энергетических реакторов, что также является источником большого количества РАО, характерных для замкнутого ЯТЦ. К дополнительным источникам РАО относятся также производство MOX-топлива и переработка РАО с образованием вторичных отходов.

Ежегодно из энергетических реакторов в мире выгружается около 11 тыс. т облученных тепловыделяющих сборок (ОТВС) в расчете на тяжелый металл (ТМ). Менее одной трети выгружаемого облученного ядерного топлива перерабатывается, а около 8 тыс. т ежегодно размещается в хранилищах. По данным МАГАТЭ, на начало 2006 года в мире выгружено примерно 280 тыс. т ТМ ОТВС, из которых около 190 тыс. т находится на хранении, в основном, в бассейнах-хранилищах с водой. Суммарное количество ОЯТ, которое будет выгружено к 2020 году, превысит 445 тыс. т.

На начало 2011 года запасы ОЯТ в России составляют порядка 21,7 тыс. тонн с активностью свыше 5 млрд. Ки, и ежегодно дополнительно образуется порядка 640-850 тонн ОЯТ. ГК «Росатом» планирует развивать переработку как основной элемент обращения с ОЯТ, что позволит стабилизировать накопление топлива, хранящегося на АЭС и в централизованных хранилищах. Без развития переработки объем накопленных в России ОЯТ к 2030 году может достичь 40 тыс. тонн, а переработка позволит уменьшить количество ОЯТ в хранилищах до 25 тыс. тонн.

Вместе с тем, переработка ОЯТ гидрометаллургическим методом PUREX (Plutonium-URanium EXtraction) является основным источником жидких РАО по количеству активности в рамках замкнутого ЯТЦ. Как отмечено в работе, программы по созданию масштабных радиохимических производств для переработки ОЯТ атомной энергетики в ряде стран (СССР/Россия, США, Великобритания, Франция, Япония, Германия, Индия, Китай) оказались технологически успешными, поскольку они опирались на достижения военных программ по получению «оружейного» плутония. В этих странах мира накоплены значительные объемы жидких радиоактивных отходов, причем основная их доля сосредоточена в России и США. Так, в 2002-2003 г.г. на предприятиях ядерного топливного цикла России 87 % суммарной активности хранящихся РАО и 97 % суммарной активности РАО, образовавшихся за год, было сосредоточено в ЖРО. На начало 2011 года в

России накоплено более 486 млн. м<sup>3</sup> ( $4,27 \cdot 10^{19}$  Бк) ЖРО, при этом прирост объемов ЖРО в 2010 году составил 3,0 млн. м<sup>3</sup> суммарной активностью 50 млн. Ки ( $1,83 \cdot 10^{18}$  Бк), из них НАО – 92,7 % с активностью  $1,7 \cdot 10^{14}$  Бк, САО – 6,8 % ( $8,8 \cdot 10^{16}$  Бк) и ВАО – 0,5 % ( $1,74 \cdot 10^{18}$  Бк).

Многокомпонентный состав жидких ВАО и совместное присутствие в их составе трансурановых элементов и продуктов деления с высоким тепловыделением (Cs-137 и Sr-90) усложняет их дальнейшую переработку, поэтому с развитием методов экстракционного разделения проводится дальнейшее фракционирование ВАО с выделением разных групп радионуклидов в соответствии с их химическими свойствами и периодом полураспада. В зависимости от типа используемых экстрагентов экстракционные методы можно разделить на несколько групп:

- экстракция кислыми фосфорорганическими соединениями (Япония, Швеция, Италия, США);
- экстракция нейтральными фосфорорганическими соединениями (США, Япония, Россия, Китай, Германия, Индия);
- экстракция моно- и диамидами (Франция);
- экстракционные технологии на основе смеси реагентов (Россия).

В России концепция фракционирования ВАО частично реализована на ФГУП ПО «Маяк», где впервые в мире создана и проверена в опытно-промышленном масштабе комплексная схема извлечения из ВАО Cs-Sr фракции и группы трансплутониевых и редкоземельных элементов (ТПЭ-РЗЭ, или актиноидно-лантаноидная фракция). Основным объектом фракционирования являются засоленные кислые растворы, не подлежащие из-за сложности состава прямому отверждению по существующей технологии остекловывания.

В работе проведена оценка содержания актиноидов и лантаноидов в актиноидно-лантаноидной фракции ВАО, перешедших в отходы после 5-тилетней выдержки ОЯТ, которая показала, что основная масса данной



фракции представлена лантаноидами, а содержание урана и трансурановых элементов (ТУЭ) составляет около 4 % от массы лантаноидов. Из лантаноидов абсолютное большинство составляют элементы цериевой группы (Ce-Sm), причем наиболее высоко содержание неодима (36,5%).

Следует отметить, что, несмотря на достигнутые успехи во фракционировании ВАО методом экстракционной переработки, концентрат редкоземельных и трансплутониевых элементов может содержать до 1 % радионуклидов цезия и стронция.

## **1.2 Современные методы иммобилизации радиоактивных отходов**

### **1.2.1 Цементирование радиоактивных отходов**

*Иммобилизация радиоактивных отходов в цемент* – кондиционирование жидких или твердых радиоактивных отходов путем смешения их с цементом или цементным раствором и последующим затвердеванием полученной массы.

Плюсы: доступности и дешевизне технологического оборудования и матричных материалов, негорючести конечного продукта, отсутствию у него пластичности, относительной простоте технологических процессов цементирование получило широкое применение при иммобилизации радиоактивных отходов. Способность цемента связывать воду особенно важна при кондиционировании жидких радиоактивных отходов (ЖРО).

Минусы: цементная матрица может быть подвержена значительной деградации со временем под действием внутренних и внешних неблагоприятных условий, имеет высокую степень в сравнение с другими методами иммобилизации выщелачивания, как следствие, компаунд обычно размещается в стальном контейнере и хранится в бетонном хранилище. Значительно увеличивает объемы компаунда (в 6–10 раз), подлежащего хранению или захоронению, что противоречит принципу минимизации РАО

и приводит к значительным финансовым затратам при строительстве хранилищ РАО. Данный факт обусловлен включением в цементный компаунд лишь 10–15 % отработанных смол.

### **1.2.2 Битумирование радиоактивных отходов**

*Иммобилизация отходов в битумы* – это включение радиоактивных отходов, в основном жидких или “влажных”, в битумные материалы, представляющие собой высокомолекулярные смеси углеводородов, в основном получающихся после отгонки легких фракций из природной нефти.

Плюсы: широкое распространение битум получил благодаря своим высоким гидроизолирующим свойствам и термопластичности, позволяющей при нагревании включать компоненты отходов с получением стабильного гомогенного продукта. Кроме того, битум как исходный материал для иммобилизации отходов весьма распространен, доступен и дешев. При битумировании ЖРО происходит испарение воды, поэтому в отличие от цементирувания иммобилизация отходов практически не сопровождается увеличением объема иммобилизованных форм отходов; кроме того, его преимуществом является хорошая влагостойкость компаундов.

Минусы: данный метод ограничивается включением в битум не более 20–30 % гигроскопических соединений, таких как ионообменные смолы, тем самым практически он мало применим для ионообменных смол, так как увеличивает объёмы ТРО в 3–5 раз. К недостаткам, ограничивающим применение битумизации, можно отнести также горючесть битума (температура воспламенения 400 оС).

### **1.2.3 Остекловывание радиоактивных отходов**

*Использования технологии остекловывания* – отверждение жидких или порошкообразных радиоактивных отходов путем смешивания их со

стеклообразующими материалами, нагрева смеси до необходимой температуры и розлива образующегося стекловидного продукта в толстостенные контейнеры из нержавеющей стали для застывания и последующего захоронения.

Плюсы: высокая химическая устойчивость к выщелачивающему действию воды; термическая и радиационная стойкость, гарантирующую отсутствие газовыделения и перехода радионуклидов в газовую фазу; механическая прочность; возможность включения в структуру стекла отходов, значительно различающихся по своему химическому составу; возможность обеспечения максимального концентрирования в процессе отверждения, благодаря чему происходит сокращение объема РАО.

Минусы: радиационное воздействие разрушает структуру стекол, превращая монолит в порошок, малая теплопроводность требует принудительного охлаждения, как следствие, невысокая стабильность физико-механических свойств стекольных матриц в течение длительного времени не отвечает требованиям их долгосрочного безопасного хранения. Так же данный метод имеет высокую стоимость и небольшую производительность.

Среди последних методов иммобилизации РАО наиболее перспективным является обезвреживание высокоактивных отходов с использованием самопроизвольных металлотермических процессов в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в долговечные синтетические минералоподобные фазы.

#### **1.2.4 Самовоспламеняющийся высокотемпературный синтез, альтернативный вид иммобилизации радиоактивных отходов**

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) – экзотермический химический процесс, протекающий в автоволновом режиме типа горения и приводящий к образованию твердых продуктов. СВС

представляет собой режим протекания экзотермической реакции, в котором тепловыделение локализовано в узком слое и передается от слоя к слою путем теплопередачи. В 1967 г. небольшая группа ученых (И. П. Боровинская, В. М. Шкиро и А. Г. Мержанов), исследуя экспериментальные модели горения конденсированных систем, открыла новое явление, получившее название «твердого пламени». Твердое пламя, которое было для того времени достаточно необычным явлением, представляет собой процесс, в котором исходные реагенты, промежуточные и конечные продукты остаются в твердом состоянии в течение всего процесса превращения. Твердое пламя позволило получать ценные тугоплавкие материалы. Это обстоятельство привело к созданию нового высокоэффективного метода их производства – самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

СВ-синтез является одним из наиболее перспективных направлений современного материаловедения. Продукты, синтезируемые указанным методом, характеризуются набором оптимальных эффективных свойств, которые достигаются наличием в структуре продукта фаз с взаимодополняющими комплексами физико-химических, механических и иных параметров. Основной задачей СВС традиционно является получение порошковых композиционных материалов (послойное горение, тепловой взрыв) для их использования в качестве различного рода защитных покрытий с использованием методов плазменного, электродугового или детонационного напыления.

С помощью СВС получают преимущественно неорганические материалы (порошки тугоплавких соединений, абразивные пасты, азотированные ферросплавы, керметы, керамику, интерметаллиды), детали и изделия заданных размеров и форм, огнеупорные изделия и покрытия, а также осуществляют неразъемное соединение деталей. Сравнительно недавно была показана возможность получения органических веществ, материалов и изделий с помощью органического СВС. Сущность метода

СВС заключается в способности порошкообразных элементов, веществ, газов, жидкостей (шихтовых смесей, прессовок) в определенных сочетаниях воспламеняться при локальном нагреве, например, от соприкосновения с разогретой электроспиралью. Далее волна горения распространяется по всему объему реагирующей системы. В результате химического взаимодействия образуются новые вещества определенной химической формулы. Как правило, взаимодействующие компоненты подбирают в стехиометрических соотношениях, поэтому «лишних» газообразных продуктов не образуется, химическая реакция протекает без взрывов. Технологические СВС-процессы экологически приемлемы, безопасны, экономичны. Реализация высоких температур без использования дополнительных источников энергии является принципиальным отличием от промышленной электрометаллургии. К основным преимуществам технологии СВС относятся: малая энергоемкость, высокая производительность (вследствие малого времени синтеза, 1-60 сек), использование более дешевого исходного сырья (оксидов металлов) и использование более дешевого оборудования.

#### *Достоинства технологии СВС*

Достоинство технологии СВС заложено в самом принципе – использование выделяющегося тепла химических реакций вместо нагрева вещества от внешнего источника, поэтому СВС процессы успешно конкурируют с традиционными энергоемкими технологиями. Порошковую смесь (шихту) помещают в реактор и в газовой среде производят локальное инициирование процесса (зажигание). Затем происходит самопроизвольное распространение волны горения, охватывающую всю смесь, завершение реакции и остывание синтезированного продукта.

Другим достоинством СВС является эффект самоочистки – термодесорбция летучих примесей при температуре синтеза. Поэтому получающиеся продукты могут быть чище, чем исходные реагенты.

В органических системах основным преимуществом технологий в сравнении с традиционными схемами органического синтеза является исключение растворителей и их аппаратуры.

СВ-синтез протекает в несколько этапов (полная схема процесса представлена на рисунке 1):

- приготовления порошка из сырья;
- смешивание порошков и компактирование (прессование, например);
- загрузка в реактор;
- инициирование;
- синтез;
- переработка продукта реакции (измельчение, рассев).

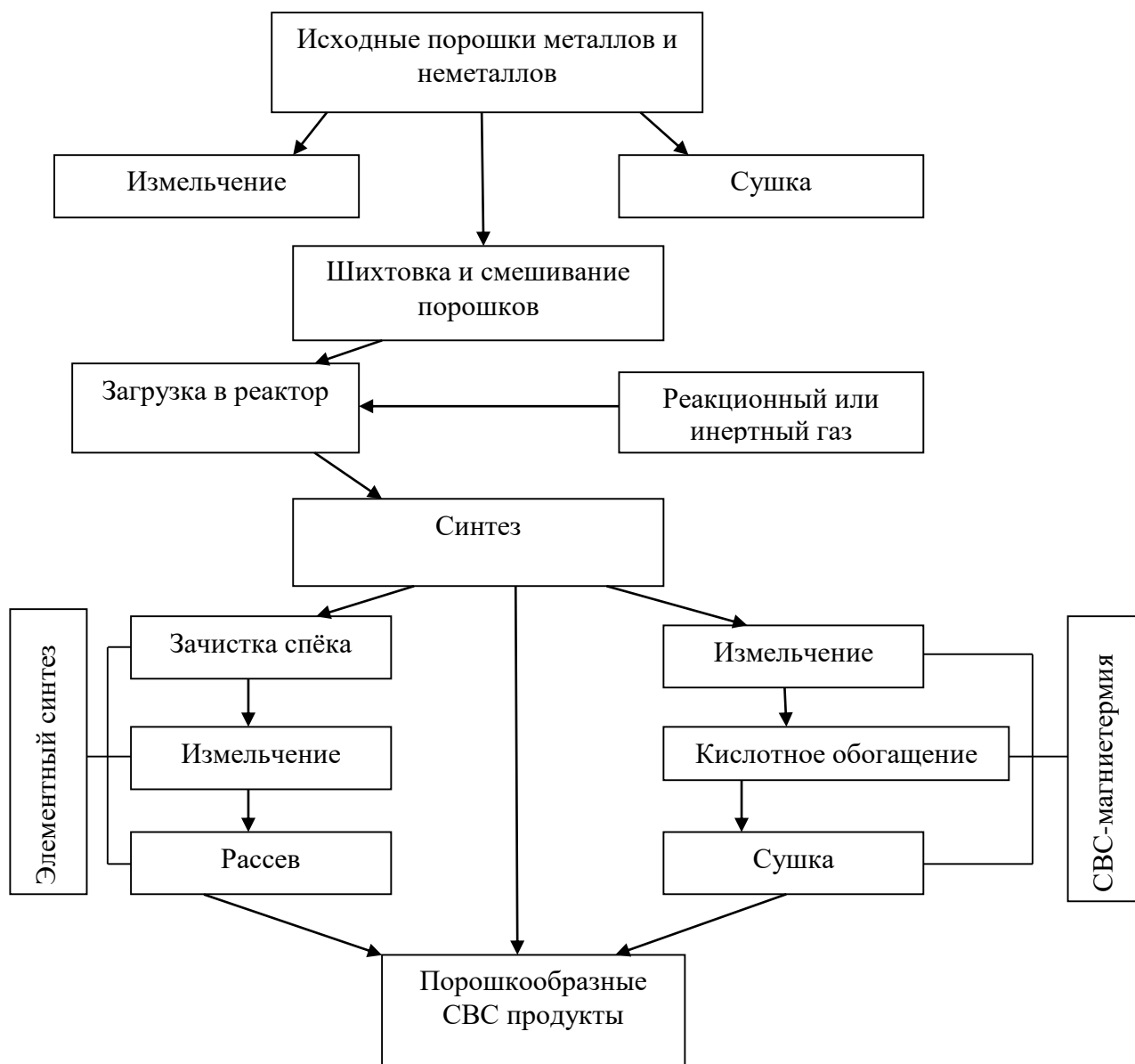


Рисунок 1.1 – Схема СВС-технологии производства порошков

Реагенты в СВС процессах используются в виде тонкодисперсных порошков, тонких пленок, жидкостей и газов. Наиболее распространены два типа систем: смеси порошков (спрессованные или насыпной плотности) и гибридные системы газ-порошок (или спрессованный агломерат). Известны СВС-процессы и в системах: порошок-жидкость, газовзвесь, пленка-пленка, газ-газ.

Главные требования к структуре исходной системы – обеспечение условий для эффективного взаимодействия реагентов.

Шихта в СВС-процессах может находиться в вакууме, на открытом воздухе, в инертном или реагирующем газе под давлением.

В создании СВС системы могут участвовать все химически активные при высоких температурах вещества в качестве реагентов (химические элементы, индивидуальные соединения, многофазные структуры) и инертные вещества в качестве наполнителей или разбавителей.

Наиболее популярные реагенты:  $H_2$ , B, Al, C,  $N_2$ ,  $O_2$ , Mg, Ti, Nb, Mo, Si, Ni, Fe,  $B_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $MoO_3$ ,  $Fe_2O_3$ , NiO и др.

В качестве реагентов используется также минеральное сырье и промышленные отходы.

Условия подбора компонентов СВС-системы:

- экзотермичность взаимодействия реагентов;
- образование полезных твердых продуктов;
- техническая и экономическая целесообразность.



## **Глава 2. Обоснование выбора шихты реагентов для обеспечения самовоспламеняющегося высокотемпературного синтеза**

Первым этапом при проведении исследований по изучению возможности управления процессом СВС при помощи давления прессования исходной шихты являлся выбор и обоснование элементного состава образца.

Мощными источниками комплексного ионизирующего излучения являются устройства, работа которых основана на делении тяжелых изотопов под действием нейтронов – ядерно-технические установки различного целевого назначения. В этом случае образуются мгновенные нейтроны и  $\gamma$ -кванты. Внутри таких устройств и в окружающих их конструкциях происходит многочисленные нейтронно-стимулированные реакции, в результате которых испускается захватное или активационное гамма-излучение, в некоторых случаях имеющее большую энергию (6-9 МэВ) и, следовательно, обладающее значительной проникающей способностью.

Таким образом, при защите от многофакторного ионизирующего излучения необходимо использовать материалы, эффективно ослабляющие различные виды излучений и при этом обладающие необходимыми эксплуатационными характеристиками: прочностными, радиационной и термической стойкостью, химической инертностью и т.д.

Главный принцип построения защит от потоков высокоэнергетических нейтронов состоит в замедлении быстрых нейтронов с последующим поглощением замедлившихся. При этом в основу создания материалов защиты должен быть положен принцип сочетания тяжелых и легких материалов.

Известно, что сравнительно высокими сечениями упругого рассеяния обладают элементы с небольшой атомной массой. Для оценки эффективности взаимодействия потока нейтронов с ядрами элементов удобно рассматривать эффективное сечение того или иного вида

взаимодействия нейтронов с ядрами –  $\sigma^{\text{эф}}$ . Так, для нейтронов спектра деления  $\sigma^{\text{эф}}$  может быть определено из выражения:

$$\sigma_i^{\text{эф}} = \int_0^\infty \sigma_i(\vec{E}) N(\vec{E}) dE \quad (2.1)$$

где  $\sigma_i(\vec{E})$  – зависимость сечения  $i$ -ого вида взаимодействия от энергии нейтронов;

$N(\vec{E})$  – энергетический спектр нейтронов деления, описываемый распределением Уатта.

В таблице 2.1 приведены данные расчетов эффективных сечений полного взаимодействия и упругого рассеяния нейтронов спектра деления с элементами, обладающими малой атомной массой. При расчетах в качестве зависимости  $\sigma_i(\vec{E})$  использовались среднегрупповые сечения взаимодействия нейтронов с ядрами.

Таблица 2.1 – Эффективные сечения полного взаимодействия и упругого рассеяния нейтронов спектра деления с элементами

Материал	Изотопный состав	Содержание в природной смеси, %	Эффективные сечения взаимодействия нейтронов спектра деления	
			$\sigma_{\text{tot}}^{\text{эф}}$ , барн	$\sigma_{\text{el}}^{\text{эф}}$ , барн
Водород	$H_1^1$	$\approx 100$	5,36	5,35
Литий	$Li_3^6$	7,52	2,37	1,77
	$Li_3^7$	92,48	1,78	1,66
Бериллий	$Be_4^9$	100	3,36	3,31
Бор	$B_5^{10}$	20	3,28	2,69
	$B_5^{11}$	80	2,47	2,47
Углерод	$C_6^{12}$	$\approx 100$	2,82	2,82
Азот	$N_7^{14}$	$\approx 100$	2,35	2,31

Для всех рассмотренных элементов характерно следующее:

– сравнительно малая вероятность взаимодействия нейтронов, обладающих энергиями более 1 МэВ;

– полное сечение взаимодействия нейтронов спектра деления практически определяется только реакцией упругого рассеяния.

Анализируя данные таблицы 2.1. можно заключит, что кроме водорода в состав защитных композиций могут быть введены такие элементы, как бор, бериллий, углерод.

При выборе тяжелой компоненты защиты от потоков нейтронов деления необходимо учитывать как полное сечение взаимодействия, так и сечение неупругого рассеяния, так как благодаря реакции неупругого рассеяния на ядрах тяжелых элементов можно достичь эффективного замедления нейтронов высоких энергий. В таблице 2.2 приведены эффективные сечения полного взаимодействия и неупругого рассеяния нейтронов спектра деления, рассчитанные по соотношению (2.1), с ядрами ряда элементов, имеющих средний и высокий атомный номер.

Таблица 2.2 – Эффективные сечения полного взаимодействия и неупругого рассеяния нейтронов спектра деления

Материал	Порог неупругого рассеяния, МэВ	Эффективные сечения взаимодействия нейтронов спектров деления	
		$\sigma_{tot}^{эф}$ , барн	$\sigma_{in}^{эф}$ , барн
Титан	0,40	3,54	0,24
Железо	0,76	3,46	0,38
Никель	1,50	3,95	0,19
Цирконий	0,80	6,92	0,31
Ниобий	0,30	7,27	0,79
Молибден	0,20	6,93	0,73
Вольфрам	0,10	7,30	1,72
Свинец	0,60	6,50	0,30
Уран	0,008	8,02	1,79

На основании данных таблицы 2.2 можно выделить группу элементов, обладающих с одной стороны сравнительно высоким сечением взаимодействия с нейтронами спектра деления, с другой – низкими значениями порога неупругого рассеяния и относительно высокими

сечениями неупругого рассеяния. Это, прежде всего, вольфрам, являющийся одним из эффективных замедлителей высокоэнергетических нейтронов среди тяжелых элементов.

Таким образом, можно предположить, что смеси вольфрама и легких элементов можно рассматривать как перспективные для защиты от потока нейтронов деления.

Как уже отмечалось, замедлившиеся до тепловых энергий нейтроны должны эффективно поглощаться материалами защиты. Среди легких элементов высокое сечение поглощения тепловых нейтронов имеет бор (сечение захвата тепловых нейтронов естественным бором составляет величину около 750 барн). Вольфрам, в свою очередь, также эффективно поглощает нейтроны низких энергий (сечение поглощения тепловых нейтронов составляет около 20 барн для естественного вольфрама).

Однако, процесс захвата тепловых и надтепловых нейтронов ядрами практически всех элементов (особенно тяжелых) сопровождается образованием  $\gamma$ -излучения. Это означает, что избежать образования захватных  $\gamma$ -квантов невозможно. Поэтому при создании защитных от нейтронных потоков материалов необходимо применять элементы, не испускающие  $\gamma$ -кванты высоких энергий в большом количестве на один захват и имеющие при этом высокие сечения поглощения низкоэнергетических нейтронов. Для определения свойств элементов с точки зрения генерации захватного  $\gamma$ -излучения удобно ввести коэффициент  $a$ , равный:

$$a = \frac{\sigma_{n\gamma}}{E_{\gamma}} \quad (2.2)$$

где  $\sigma_{n\gamma}$  — микроскопическое сечение реакции  $(n, \gamma)$ ;

$E_{\gamma}$  — средняя энергия  $\gamma$ -квантов, испускаемых при захвате нейтронов;

Очевидно, что больше коэффициента  $b$ , тем наиболее приемлем элемент в защите от потоков нейтронов с точки зрения параметров,

характеризующих процесс захвата низкоэнергетических нейтронов. Одновременно с этим материалы должны эффективно ослаблять образующееся  $\gamma$ -излучение. В таблице 2.3 приведены некоторые характеристики захватного  $\gamma$ -излучения ряда элементов, образованного в результате реакции  $(n, \gamma)$ .

Таблица 2.3 – некоторые параметры реакций  $(n, \gamma)$  для ряда элементов

Элемент	Сечение реакции $(n, \gamma)$ для тепловых нейтронов ( $v=2200$ м/с), барн	Среднее число $\gamma$ -квантов, испускаемых на один захват теплового нейтрона	$a = \frac{\text{барн}}{\text{МэВ}}$
водород	0.355	1.00	0.193
бериллий	0.01	1.27	0.002
углерод	3.37	1.00	0.001
азот	0.08	0.92	0.008
алюминий	0.241	6.00	0.254
титан	5.8	3.34	2.00
железо	2.62	2.50	1.09
кобальт	36.3	2.07	12.3
медь	3.79	2.41	1.67
ниобий	1.16	0.68	0.261
молибден	2.70	2.68	1.41
индий	194	4.17	510
гафний	101.4	4.24	338
вольфрам	20.0	2.78	20.0
свинец	0.17	1.00	0.023
уран	2.71	5.57	5.89

Мощность источников захватного  $\gamma$ -излучения в тяжелых элементах с высоким сечением захвата определяется поглощением низкоэнергетических

нейтронов, замедленных как самым тяжелым элементом, так и легкой компонентной защитного материала.

При защите от потоков комплексного ионизирующего излучения целесообразно использование материалов, в состав которых входят различные элементы. Как уже упоминалось ранее, при защите от потоков высокоэнергетического нейтронного излучения целесообразно применение смеси легких и тяжелых элементов. В таких материалах содержание тяжелой компоненты должно обеспечивать эффективное ослабление потоков  $\gamma$ -излучения. В этой ситуации необходимо рассмотрение не микро-, а макроскопических параметров, характеризующих поглощение  $\gamma$ -квантов теми или иными материалами. Например, линейный коэффициент ослабления  $\gamma$ -квантов деления -  $\mu$ , являющийся величиной, обратной средней длине свободного пробега  $\gamma$ -кванта в веществе.

На рис. 2.1 приведены зависимости коэффициента  $\mu$  от содержания тяжелой компоненты в защитном материале  $\omega$ , % вес. – для бор содержащих смесей при их плотности 3 г/см<sup>3</sup>. Кроме урана в качестве тяжелой компоненты могут быть использованы вольфрам или свинец.

Проведенный анализ свойств ряда защитных материалов от мощных потоков ионизирующего излучения материалов позволяет сформулировать следующие выводы и требования, предъявляемые к ним:

1. при выборе элементного состава защитных материалов необходимо руководствоваться следующим:

– тяжелая компонента защиты должна, с одной стороны, иметь высокое сечение неупругого рассеяния нейтронов спектра деления и низкое значение порога неупругого рассеяния нейтронов (вольфрам, молибден, ниобий), с другой – иметь высокое сечение захвата замедлившихся нейтронов и при этом испускать низкоэнергетическое захватное  $\gamma$ -излучение (индий, вольфрам, гафний);

– легкая компонента должна эффективно замедлять быстрые нейтроны в процессе упругого рассеяния (бериллий, углерод, бор) и обладать высоким сечением захвата низкоэнергетических нейтронов (бор).

2. В состав защиты необходимо включить элементы с высоким атомным номером и высокой плотностью с целью эффективного ослабления потоков  $\gamma$ -излучения различных энергетических спектров (свинец, уран, вольфрам и т.д.)

Таким образом при защите от потоков ионизирующего излучения ядерных энергетических установок возможно использование материалов, содержащих в своем составе такие материалы, как бор, вольфрам, индий и ряд других. К таким материалам, например, могут быть отнесены бориды металлов с высоким атомным номером, обладающие высокой ядерной концентрацией тяжелой компоненты. В данной работе было предложено использование таких соединений как WB.

На рис. 2.3 приведена диаграмма состояния W-B, которая, за исключением отдельных участков фазовых равновесий, отражает современные представления о существовании возможных боридных фаз в этой системе.

По данным различных работ в системе вольфрам-бор существуют следующие бориды:  $W_2B$ , обладающий узкой областью гомогенности и высокой твердостью (~24.20 ГПа), две модификации моноборида: WB (низкотемпературная) и WB (высокотемпературная) с температурой перехода 2300-2400 °С. Авторы работ обнаружили полиморфизм борида  $W_2B_5$  (пентаборид дивольфрама), который показан на диаграмме состояний вольфрам-бор (рис 2.3.)(стр 30).

Известно, что стойкость диборидов переходных металлов VI группы уменьшается по мере увеличения атомного номера металла. Лундстрем показал, что существует борид вольфрам состава  $WB_{2.00} - WB_{2.27}$  с очень широкой областью гомогенности. Структура описанного борида близка к структуре  $W_2B_5$ , но отличается от нее наличием двух типов борных слоев

(гофрированных и плоских гексагональных), в которых расстояние В-В разные: в гофрированных слоях оно равно 0.185 нм, в плоских 0.172 нм. Структура  $WB_{2...2.27}$  еще более дефектна по бору, чем  $W_2B_5$ .

Сложность аналитического определения свободного бора в бориде привела к тому, что высшим боридом вольфрама на протяжении длительного времени приписывался различный формульный состав:  $WB_4$ ,  $WB_{12}$ ,  $W_{2-x}B_9$ . Тщательное исследование кристаллической структуры высшего борида вольфрама, проведенное Лундстремом, обнаружило ее высокую дефектность. Металлическую подрешетку образуют дефектные (двух типов –  $A'$  и  $B'$ ) плоские слои из атомов металла, борная решетка представлена плоскими сетками из шестичленных колец из атомов бора(Н). Слои из атомов металла и бора в структурном типе  $W_{1-x}B_3$  ( $x < 0.2$ ) чередуются таким образом ( $A'NB'NA'N...$ ), что в структуре появляются вытянутые вдоль оси с пустоты, размер которых позволяет разместиться в них атомам бора. Однако даже при содержании в образцах избыточного бора эти вакансии остаются незаполненными, слои из атомов металла заполняются только на 60%. Несмотря на высокую дефектность кристаллической структуры высших боридов W, которым приписана формула  $W_{1-x}B_3$ , предполагает наличие в них очень узкой области гомогенности.



## **Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Целью данного раздела является проектирование и создание конкурентоспособных разработок и технологий, отвечающих предъявляемым требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- разработка общей экономической идеи проекта, формирование концепции проекта;
- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

В данной диссертационной работе проведена серия экспериментов по перовскитоподобной керамики для иммобилизации радиоактивных отходов. Информация о полученных образцах была получена после проведения процедуры рентгенофазового анализа на рентгеновском дифрактометре XRD-7000S.

### **4.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Результатом исследования является определение пригодности перовскитной матрицы для надежного и долговременного безопасного хранения радиоактивных отходов актиноидной фракции.

Целевым рынком данного исследования будут являться государственные корпорации по атомной энергетике, атомная и смежные отрасли научной промышленности, предприятия по хранению и переработке радиоактивных отходов.

Сегментировать рынок услуг по разработке оптимальной методики создания керамических матриц для хранения РАО можно по степени потребности использования данной методики. Результаты сегментирования представлены в рисунке 4.1.

		Получение перовскитоподобной керамики		
		Атомная промышленность	Научная отрасль	Хранение и переработка РАО
Потребность	Сильная			
	Слабая			

Рисунок 4.1 – Карта сегментирования рынка услуг по использованию оптимальной методики измерения

#### 4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Как упоминалось выше, в данной работе определена пригодность использования керамической матрицы для иммобилизации радиоактивных отходов. Таким образом, для анализа конкурентных технических решений стоит рассмотреть методы отвержения радиоактивных отходов, наиболее часто применяемые на практике:

- иммобилизация в стеклянной матрице;
- иммобилизация в матрице СИНРОК
- иммобилизация с использованием цементирование отходов.

Оценочная карта анализа представлена в таблице 4.1.1. Позиция разработки и конкурентов оценивается по каждому показателю экспертным путем по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в

сумме должны составлять 1. Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (1)$$

где:  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Таблица 4.1.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		$B_{\phi}$	$B_{k1}$	$B_{k2}$	$K_{\phi}$	$K_{k1}$	$K_{k2}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Повышение производительности труда пользователя	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
2. Удобство в эксплуатации	0,1	5	4	3	0,5	0,4	0,3
3. Энергоэкономичность	0,04	5	3	3	0,2	0,12	0,12
4. Надежность	0,05	5	4	4	0,25	0,2	0,2
5. Уровень шума	0,01	5	5	5	0,05	0,05	0,05
6. Безопасность	0,06	5	5	5	0,3	0,3	0,3
7. Потребность в материальных ресурсах	0,04	4	4	4	0,16	0,16	0,16
8. Функциональная мощность	0,05	5	4	3	0,25	0,2	0,15
9. Помехоустойчивость	0,07	5	3	3	0,35	0,21	0,21
10. Простота эксплуатации	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность метода	0,03	5	4	4	0,15	0,12	0,12
2. Уровень проникновения на рынок	0,05	5	4	3	0,25	0,2	0,15
3. Предполагаемый срок эксплуатации	0,2	5	4	4	1	0,8	0,8
4. Послепродажное обслуживание	0,1	5	3	3	0,5	0,3	0,3
Итого	1				4,96	3,86	3,66

На основании представленного выше анализа можно сделать вывод, что разработанная в данной диссертационной работе методика является оптимальной для использования в практических целях. Конкурентные методы определения изотопного состава достаточно уязвимы, в силу отсутствия конкретного алгоритма действий, способного уменьшить погрешность измерительного процесса.

#### **4.1.2 SWOT-анализ**

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем.

В таблице 4.1.2 представлена интерактивная матрица проекта, в которой показано соотношение сильных сторон с возможностями, что позволяет более подробно рассмотреть перспективы разработки.

Таблица 4.1.2 – Интерактивная матрица проекта

Возможности проекта	Сильные стороны проекта				
	C1	C2	C3	C4	C5
B1	+	+	+	+	+
B2	+	+	+	+	+
B3	+	+	–	+	+
B4	+	+	+	+	+
B5	+	+	+	+	+

В матрице пересечения сильных сторон и возможностей имеет определенный результат: «плюс» – сильное соответствие сильной стороны и возможности, «минус» – слабое соотношение.

В результате была составлена итоговая матрица SWOT-анализа, представленная в таблице 4.1.3.

Таблица 4.1.3 – SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны проекта:</p> <p>C1. Актуальность выбранной темы.</p> <p>C2. Применение современного оборудования.</p> <p>C3. Бюджетное финансирование</p> <p>C4. Наличие достоверных результатов измерений.</p> <p>C5. Возможность оптимизации процесса подготовки образцов.</p>	<p>Слабые стороны проекта:</p> <p>Сл1. Ограниченное количество иммобилизованных фракций.</p> <p>Сл2. Ограниченное количество измерений.</p> <p>Сл3. Невозможность измерений механической прочности.</p> <p>Сл4. Длительный срок поставки материалов, необходимых для создания матрицы.</p> <p>Сл5. Длительный срок измерения фазового состава.</p>
--	---	--

Продолжение таблицы 4.1.3 – SWOT-анализ

<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование для исследований инфраструктуры НИ ТПУ.</p> <p>В2. Разработка рекомендаций по методу синтеза матриц.</p> <p>В3. Возможность создания новых условий для проведения эксперимента.</p> <p>В4. Поддержка развития атомной энергетики со стороны государства.</p> <p>В5. Дополнительный спрос на результаты исследования.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и возможности»:</p> <p>1. Полное обеспечение условий проведения экспериментов.</p> <p>2. Появление дополнительного спроса и финансирования, обеспеченных актуальностью тематики.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и возможности»:</p> <p>1. Срок поставки и наличие материалов, необходимых для проведения экспериментов, хоть и играют роль, но в сущности незначительную.</p> <p>2. Также незначителен и срок измерений образцов, т.к. это сложная операция с повышенной точностью.</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1. Возможность отсутствия реагентов.</p> <p>У2. Вероятность разработки подобных методик анализа изотопного состава другими организациями.</p> <p>У3. Задержка финансирования экспериментов.</p> <p>У4. Низкий спрос на результаты исследования или его отсутствие.</p> <p>У5. Разработка новейших методик создания матриц.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Сильные стороны и угрозы»:</p> <p>1. Актуальность темы и широта распространения исследований на данную тематику заставляет заказчиков заранее обеспечить непрерывные поставки порошков для дальнейших исследований.</p>	<p>Результаты анализа интерактивной матрицы проекта полей «Слабые стороны и угрозы»:</p> <p>1. Ограниченное количество измерений, отсутствие измерений на механическую прочность, сбой в поставках составляющих порошков – всё это представляет собой наиболее уязвимые места разработки. Однако, рассмотренные возможности проекта могут снизить влияние перечисленных выше недостатков.</p>

Таким образом, выполнив SWOT-анализ можно сделать вывод, что на данный момент преимущества разработанной методики измерений

значительно преобладают над её недостатками. Все имеющиеся несовершенства можно легко устранить, воспользовавшись перечисленными выше возможностями.

## 4.2 Планирование управления научно-техническим проектом

### 4.2.1 Иерархическая структура работ проекта

Иерархическая структура работ (ИСР) – детализация укрупненной структуры работ. В процессе создания ИСР структурируется и определяется содержание всего проекта.



Рисунок 4.2.1 – Иерархическая структура работ

### 4.2.2 Контрольные события проекта

Ключевые события исследовательского проекта, их даты и результаты приведены в таблице 4.2.2.

Таблица 4.2.2 – Контрольные события проекта

№	Контрольное событие	Дата	Результат (подтверждающий документ)
1	Разработка технического задания на НИР	1.02.2016	Приказ по ФТИ
2	Составление и утверждение технического задания	3.02.2016	Задание на выполнение исследования
3	Выбор направления исследований	5.02.2016	
4	Подбор и изучение материалов по теме	10.02.2016	Отчёт
5	Календарное планирование работ	12.02.2016	План работ
6	Изучение особенностей подготовки образцов	13.02.2016	Отчёт
7	Освоение методики синтеза матриц	14.02.2016	Отчёт
8	Проведение экспериментов	15.02.2016-30.03.2016	Отчёт
9	Выполнение расчётов и анализ полученных данных	28.03.2016	Отчёт
10	Обобщение и оценка результатов	30.03.2016	Отчёт
11	Составление пояснительной записки	14.02.2016-25.04.2016	Пояснительная записка
12	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	26.04.2016	
13	Подготовка к защите	27.04.2016-25.05.2016	

#### 4.2.3 План проекта

В рамках планирования исследовательского проекта построен календарный план-график с помощью диаграммы Ганта. В данном случае работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения работ.

Линейный график представлен в таблице 4.2.3.



















Таблица 4.2.3 – Календарный план проекта

Код работы	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Разработка технического задания	2	1.02.2016	3.02.2016	Руководитель
2	Составление и утверждение технического задания	2	3.02.2016	5.02.2016	Руководитель
3	Выбор направления исследований	5	5.02.2016	10.02.2016	Руководитель, студент
4	Подбор и изучение материалов по теме	2	10.02.2016	12.02.2016	Студент
5	Календарное планирование работ	1	12.02.2016	13.02.2016	Руководитель, студент
6	Изучение особенностей подготовки образцов	1	13.02.2016	14.02.2016	Студент
7	Освоение методики синтеза матриц.	1	14.02.2016	14.02.2016	Студент
8	Проведение экспериментов	45	15.02.2016	30.03.2016	Студент
9	Выполнение расчётов и анализ полученных данных	2	28.03.2016	30.03.2016	Студент
10	Обобщение и оценка результатов	1	30.03.2016	30.03.2016	Руководитель, студент
11	Составление пояснительной записки	72	14.02.2016	25.04.2016	Студент
12	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	1	26.04.2016	27.04.2016	Руководитель, студент
13	Подготовка к защите	29	27.04.2016	25.05.2016	Студент

В таблице 4.2.4 представлен календарный план-график проведения научного исследования.

Таблица 4.2.4 – Календарный план-график проведения научного исследования

№ работ	Вид работ	Исполнители	Т <sub>к</sub> , кал.д н.	Продолжительность выполнения работ													
				Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь	
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
1	Разработка технического задания	Руководитель	2														
2	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	2														
3	Выбор направления исследований	Руководитель, студент	5	 													
4	Подбор и изучение материалов по теме	Студент	2														
5	Календарное планирование работ	Руководитель, студент	1	 													
6	Изучение особенностей подготовки образцов	Студент	1														
7	Освоение методики синтеза матриц	Студент	1														
8	Проведение экспериментов	Студент	45														
9	Выполнение расчётов и анализ полученных данных	Студент	2														
10	Обобщение и оценка результатов	Руководитель, студент	1						 								
11	Составление пояснительной записки	Студент	72														
12	Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	Руководитель, студент	1									 					
13	Подготовка к защите	Студент	29														



Руководитель



Студент

### 4.3 Бюджет научного исследования

При планировании бюджета исследования должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

#### 4.3.1 Расчёт материальных затрат

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{\text{расх}i},$$

где  $m$  – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования;

$N_{\text{расх}i}$  – количество материальных ресурсов  $i$ -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м<sup>2</sup> и т.д.);

$C_i$  – цена приобретения единицы  $i$ -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м<sup>2</sup> и т.д.);

$k_T$  – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы, принимаются в пределах 15-25 % от стоимости материалов.

Основными затратами в данной исследовательской работе являются затраты на электроэнергию и приобретение канцелярских товаров. Результаты расчётов по затратам на материалы приведены в таблице 4.3.1.

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$C = C_{\text{эл}} \cdot P \cdot F_{\text{об}} = 2,05 \cdot 3,6 \cdot 26 + 2,05 \cdot 0,5 \cdot 400 = 601,$$

где  $C_{\text{эл}}$  – тариф на промышленную электроэнергию (2,05 руб. за 1 кВт·ч);

$P$  – мощность оборудования, кВт;

$F_{\text{об}}$  – время использования оборудования, ч.

Затраты на электроэнергию составили 601, рубль.

Таблица 4.3.1 – Материальные затраты

Наименование	Марка, размер	Количество	Цена за единицу, руб.	Сумма, руб.
Электроэнергия	–	293,6 кВт·ч	2,05	601
Бумага	SvetoCopy	200	0,38	76
Печать на листе А4	–	200	1,5	300
Ручка	Bic	1	50	50
Доступ в интернет	–	4 месяца	350	1400
Всего за материалы				2058,8
Транспортно-заготовительные расходы				0
Итого по статье $C_{\text{м}}$				2058,9

#### 4.3.2 Расчёт затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных работ)

В данную статью включают все затраты, связанные с приобретением специального оборудования, необходимого для проведения работ по конкретной теме.

В данной исследовательской работе к спецоборудованию, необходимому для проведения экспериментальных работ, относится кубический смеситель марки AR 403 All-Purpose Equipment (Германия) – 10 лет.

Затраты на амортизацию оборудования рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{аморт}} = C_{\text{об}} / T,$$

где  $C_{\text{об}}$  – стоимость оборудования (руб);

$T$  – срок службы (дней).

$$C_{\text{аморт}} = (3000000 / 3650) = 821,9 \text{ руб/дн.}$$

Оборудование использовалось в течение 12 дней, таким образом, затраты на оборудование:

$$C_{\text{аморт(общ)}} = 821,9 \cdot 12 = 9863 \text{ руб.}$$

#### 4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$C_{\text{зп}} = Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}},$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата;

$Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата.

Основная заработная плата ( $Z_{\text{осн}}$ ) руководителя рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}},$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата одного работника;

$T_{\text{раб}}$  – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб.дн.

$Z_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле

$$Z_{\text{дн}} = (Z_{\text{м}} \cdot M) / F_{\text{д}},$$

где  $Z_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника, руб.;

$M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

- при отпуске в 24 раб. дня  $M=11,2$  месяца, 5-дневная неделя;
- при отпуске в 48 раб. дней  $M=10,4$  месяца, 6-дневная неделя;

$F_{\text{д}}$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн. (таблица 4.3.3).

Таблица 4.3.3 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней:		
– выходные дни;	52	104
– праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени:		
– отпуск;	48	24
– невыходы по болезни	7	–
Действительный годовой фонд рабочего времени	244	223

Студент во время прохождения преддипломной практики получает стипендию, равную 5670 руб/месяц. Среднедневная стипендия (оплата) составляет:

$$З_{\text{дн}} = (5670 \cdot 11,2) / 223 = 284,7 \text{ руб/день.}$$

Основной заработок студента за время преддипломной практики составляет:

$$З_{\text{осн}} = 284,7 \cdot 45 = 12814 \text{ руб.}$$

Основная заработная плата научного руководителя рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

- оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор.

- стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

- иные выплаты: районный коэффициент.

Руководителем данной научно-исследовательской работы является сотрудник с должностью старшего преподавателя. Оклад старшего преподавателя составляет 16752 рубля.

Надбавки к заработной плате составляют 10000 рублей (надбавки учёного совета), также районный коэффициент по Томску равен 1,3.

Основная заработная плата научного руководителя:

$$З_{\text{осн}} = 16752 \cdot 1,3 + 10000 = 31777,6 \text{ руб / месяц.}$$

Среднедневная заработная плата научного руководителя:

$$З_{\text{дн}} = (31777,6 \cdot 10,4) / 244 = 1354,45 \text{ руб} / \text{день}.$$

#### 4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}},$$

где  $З_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной заработной платы;

$З_{\text{осн}}$  – основная заработная плата, руб.

Примем коэффициент дополнительной заработной платы равным 0,15 для научного руководителя и 0,1 для студента. Результаты расчёта основной и дополнительной заработной платы исполнителей научного исследования представлены в таблице 4.3.4.

Таблица 4.3.4 – Заработная плата исполнителей исследовательской работы

Заработная плата, руб.	Руководитель	Студент
Основная зарплата	31777,6	11457
Дополнительная зарплата	4766,64	1145,7
Зарплата исполнителя	36544,24	12602,7
Итого по статье $C_{\text{зп}}$	49146,94	

#### 4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды

Размер отчислений во внебюджетные фонды составляет 27,1 % от суммы затрат на оплату труда работников, непосредственно занятых выполнением исследовательской работы.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Величина отчислений во внебюджетные фонды составляет:

$$C_{\text{внеб}} = 0,271 \cdot (31777,6 + 4766,64) = 9903,48 \text{ руб.}$$

#### 4.3.6 Накладные расходы

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию, эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов.

Накладные расходы в ТПУ составляют 25-35 % от суммы основной и дополнительной зарплаты работников, участвующих в выполнении темы.

Примем  $k_{\text{накл}} = 30 \%$ .

Накладные расходы составляют:

$$C_{\text{накл}} = 0,3 \cdot (31777,6 + 4766,64) = 10963,3 \text{ руб.}$$



#### 4.3.7 Формирование бюджета затрат исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 4.3.7.

Таблица 4.3.7 – Расчёт бюджета затрат исследовательского проекта

Наименование статьи	Сумма, руб
1. Материальные затраты исследования	2058,9
2. Затраты на специальное оборудование	9863
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	43234,6
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	49146,9
5. Отчисления во внебюджетные фонды	9903,5
6. Накладные расходы	10963,3
Бюджет затрат исследования	125169,7

#### 4.4 Организационная структура проекта

Организационная структура проекта представляет собой временное структурное образование, создаваемое для достижения поставленных целей и задач проекта и включающее в себя всех участников процесса выполнения работ на каждом этапе.

Данной исследовательской работе соответствует функциональная структура организации. То есть организация рабочего процесса выстроена иерархически: у каждого участника проекта есть непосредственный руководитель, сотрудники разделены по областям специализации, каждой группой руководит компетентный специалист (функциональный руководитель).

Организационная структура научного проекта представлена на рисунке 4.4.



Рисунок 4.4 – Организационная структура научного проекта

#### 4.5 Матрица ответственности

Степень ответственности каждого члена команды за принятые полномочия регламентируется матрицей ответственности. Матрица ответственности данного проекта представлена в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Матрица ответственности

Этапы проекта	Научный руководитель	Консультант раздела «Финансовый менеджмент»	Консультант раздела «Соответственность»	Консультант по языковому разделу	Студент
Разработка технического задания	О				
Составление и утверждение технического задания	О				
Выбор направления исследований	О				И

Продолжение таблицы 4.5 – Матрица ответственности

Подбор и изучение материалов по теме	С				И
Календарное планирование работ	О				И
Изучение особенностей подготовки образцов	С				И
Освоение методики синтеза матриц	С				И
Проведение экспериментов	О				И
Выполнение расчётов и анализ полученных данных	О				И
Выполнение оценки ресурсоэффективности и ресурсосбережения		С			И
Выполнение раздела по социальной ответственности			С		И
Выполнение перевода части работы на английский язык				С	И
Обобщение и оценка результатов	С				И
Составление пояснительной записки	С				И
Проверка правильности выполнения ГОСТа пояснительной записки	С				И
Подготовка к защите	О				И

Степень участия в проекте характеризуется следующим образом:

- ответственный (О) – лицо, отвечающее за реализацию этапа проекта и контролирующее его ход;
- исполнитель (И) – лицо (лица), выполняющие работы в рамках этапа проекта. Утверждающее лицо (У) – лицо, осуществляющее утверждение результатов этапа проекта (если этап предусматривает утверждение);
- согласующее лицо (С) – лицо, осуществляющее анализ результатов проекта и участвующее в принятии решения о соответствии результатов этапа требованиям.

#### 4.6 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования (см. табл. 4.6). Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется:

$$I_{финр}^{исп.i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}},$$

где  $I_{финр}^{исп.i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{max}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Так как разработка имеет одно исполнение, то

$$I_{финр}^p = \frac{\Phi_p}{\Phi_{max}} = \frac{125169,7}{125169,7} = 1;$$

Для аналогов соответственно:

$$I_{финал}^{a1} = \frac{\Phi_{a1}}{\Phi_{\max}} = \frac{145500,2}{125169,7} = 1,16; \quad I_{финал}^{a1} = \frac{\Phi_{a1}}{\Phi_{\max}} = \frac{161260,3}{125169,7} = 1,29$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i^a, b_i^p$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Расчёт интегрального показателя ресурсоэффективности представлен ниже.

Таблица 4.6 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

ПО Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог 1	Аналог 2
1. Способствует росту производительности труда пользователя	0,25	5	3	3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей)	0,2	5	3	3
3. Помехоустойчивость	0,05	5	3	2
4. Энергосбережение	0,2	5	2	2
5. Надёжность	0,15	5	4	3
6. Материалоёмкость	0,15	5	4	4
ИТОГО	1	5	3,1	2,9

$$I_{\text{тп}} = 5 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,05 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,15 + 5 \cdot 0,15 = 5;$$

$$\text{Аналог 1} = 3 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 = 3,1;$$

$$\text{Аналог 2} = 3 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,15 + 4 \cdot 0,15 = 2,9.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ( $I_{финр}^p$ ) и аналога ( $I_{финаi}^{ai}$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_{финр}^p}; \quad I_{финаi}^{ai} = \frac{I_m^{ai}}{I_{финаi}^{ai}};$$

В результате:

$$I_{финр}^p = \frac{I_m^p}{I_{финр}^p} = \frac{5}{1} = 5; \quad I_{фина1}^{a1} = \frac{I_m^{a1}}{I_{фина1}^{a1}} = \frac{3,1}{1,05} = 2,95; \quad I_{фина2}^{a2} = \frac{I_m^{a2}}{I_{фина2}^{a2}} = \frac{2,9}{1,16} = 2,5.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности текущего проекта и аналогов позволит определить сравнительную эффективность проекта.

Сравнительная эффективность проекта:

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финаi}^{ai}}$$

Результат вычисления сравнительной эффективности проекта и сравнительная эффективность анализа представлены в таблице 4.6.1.

Таблица 4.6.1 – Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Аналог 1	Аналог 2	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	1,16	1,29	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3,1	2,9	5
3	Интегральный показатель эффективности	2,95	2,5	5
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,69	2	1

Таким образом, основываясь на определении ресурсосберегающей, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности

исследования, проведя необходимый сравнительный анализ, можно сделать вывод о превосходстве выполненной разработки над аналогами.

## **Список публикаций студента**